

УДК 623.611;621.396;519.876.5

# Метод математичного моделювання функціонування системи радіозв'язку (метод мультитензора)

*Свида І. Ю., Волобуєв А. П., Бухал Д. А.*

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України

E-mail: [voin2002@ukr.net](mailto:voin2002@ukr.net)

У статті запропонований метод математичного моделювання функціонування системи радіозв'язку (метод мультитензора), який є основою для розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації і враховує крім відомих обмежень щодо збереження інформаційного потоку, маршрутних змінних, навантаження на систему радіозв'язку, швидкості, термінів проходження інформаційних потоків та надійності їх доставляння до абонентів ще й обмеження щодо розвідувальної доступності маршрутів проходження інформаційних потоків, що є суттєвим для військового радіозв'язку. Показано, що приведення до тензорного вигляду моделі системи радіозв'язку, засновуючись на геометризації її структури з введенням дискретного простору, надає можливість описати систему чотирьохвалентним геометричним об'єктом змішаного виміру – мультитензором і дозволяє визначити маршрути проходження інформаційних потоків з мінімальною розвідувальною доступністю.

**Ключові слова:** математичне моделювання; система радіозв'язку; багатошляхова маршрутизація; розвідувальна доступність; інформаційний потік; тензорне числення

## 1 Постановка проблеми у загальному вигляді

У зв'язку з появою в провідних країнах світу систем радіорозвідки нового покоління [1] та через відставання України у питаннях створення сучасних розвідуваних систем радіозв'язку виникла невідповідність між наявними спроможностями систем радіозв'язку щодо боротьби з радіорозвідкою та спроможностями, що потрібні для боротьби з системами радіорозвідки нового покоління. Ця невідповідність вимагає розроблення методів боротьби систем радіозв'язку із системами радіорозвідки нового покоління.

## 2 Аналіз останніх досліджень та публікацій

В якості одного із таких методів доцільно розглядати метод багатошляхової маршрутизації, який зазвичай розглядався лише як метод забезпечення передавання зростаючих обсягів трафіка з необхідною якістю [2–17].

Обмежимо аналіз дослідженнями і публікаціями, які пов'язані із розробленням методичного апарату багатошляхової маршрутизації на базі тензорних моделей функціонування систем радіозв'язку.

Це обумовлено природою задачі багатошляхової маршрутизації, яка за характером змінних, що в ній використовуються, не є ані тривимірною, ані евклідовою. Крім того, математичний апарат тензорного числення є одним з найбільш зручних математичних інструментів системного розв'язання складних задач з будь-якою кількістю змінних та швидкого отримання чисельних результатів [18, 19]. Найбільш вагомих результатів, на наш погляд, в цьому напрямку вдалося досягнути в роботах [9–17].

Основа для застосування апарату тензорного числення в інтересах розв'язання маршрутних задач створювали в [9–11], де було запропоновано подання телекомунікаційних систем у вигляді сімпліціальних комплексів, а також запропоновані підходи до системного дослідження цих систем за допомогою тензорного аналізу на поточкових моделях з відпрацюванням відповідної методології. В подальшому ця методологія отримала розвиток за рахунок впровадження QoS-маршрутизації [12, 13, 15, 17], зокрема для мереж нового покоління (Next Generation Network), що вилилося у мультитензорну інтерпретацію розв'язання маршрутних задач [14]. Також були запропоновані підходи до раціонального розподілу мережевих ресурсів [16].

Основою даних робіт є математичне моделювання функціонування систем радіозв'язку за допомогою різноманітних тензорних моделей з накладанням обмежень на інтенсивності інформаційних

потоків, терміни та надійність проходження інформації, навантаження системи тощо. Але можливості даного апарату математичного моделювання для вирішення задач боротьби із системами радіорозвідки нового покоління дещо обмежені через те, що він не враховує розвідувальної доступності окремих радіостанцій, ліній прямого зв'язку та маршрутів проходження інформаційних потоків, що обумовлює його подальший розвиток.

Тому, **метою статті** є подальший розвиток методу математичного моделювання функціонування системи радіозв'язку на базі апарату тензорного числення в інтересах розв'язання задачі багатопрохідної маршрутизації для адаптації його під задачу боротьби із системами радіорозвідки нового покоління.

### 3 Виклад основного матеріалу дослідження

Отже, *на першому етапі* існуючого методу математичного моделювання функціонування системи радіозв'язку її подають зваженим графом  $\Gamma = (M, D)$  (рис. 1), де  $M$  – множина вершин (множина радіостанцій),  $D$  – множина дуг (множина ліній прямого зв'язку),  $\varphi_{sd}$  – пропускна спроможність лінії прямого зв'язку.

Як можна бачити, в якості вагових коефіцієнтів окремих дуг виступають пропускні спроможності ліній прямого зв'язку системи радіозв'язку. З метою подальшого розвитку даного методу математичного моделювання та його адаптації під задачу боротьби з системами радіорозвідки нового покоління, введемо вагові коефіцієнти вершин графу  $\Gamma$ , а саме, розвідувальні доступності радіостанцій [20–23]  $r_s$  – (розвідувальна доступність  $s$ -ї радіостанції для системи радіорозвідки противника). Під розвідувальною доступністю радіостанції будемо розуміти ступінь легкості, з якою вона може бути викрита системою радіорозвідки противника.

Типовими обмеженнями на процес інформаційного обміну в структурі системи радіозв'язку, які також вводяться на першому етапі методу математичного моделювання, що розглядається, є такі [12–16]:

#### 1 група обмежень:

*Обмеження щодо збереження інформаційного потоку*

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} + \sum_{s \in M_i} \gamma_{sj} \phi_{si}^{(j)} &= \sum_{s \in M_i} \gamma_{ij} \phi_{is}^{(j)} = \gamma_{ij} \\ \lambda_{ij} &= \sum_{k_{ij}=1}^{K_{ij}} \lambda^{(k_{ij})}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\lambda_{ij}$  – загальна інтенсивність власного інформаційного потоку  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції;

$M_i$  – множина радіостанцій, сусідніх до  $i$ -ї радіостанції;  $\gamma_{sj}$  – інтенсивність повного інформаційного потоку від  $s$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції;  $\phi_{si}^{(j)}$  – доля інтенсивності  $si$  (маршрутна змінна);  $\gamma_{ij}$  – інтенсивність повного інформаційного потоку від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції;  $\phi_{is}^{(j)}$  – доля інтенсивності  $\gamma_{ij}$  на лінії прямого зв'язку  $is$  (маршрутна змінна);  $K_{ij}$  – кількість часткових інформаційних потоків від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції;  $\lambda^{(k_{ij})}$  – інтенсивність  $k$ -го часткового інформаційного потоку від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції.

*Обмеження щодо маршрутних змінних*

$$\begin{aligned} \phi_{is}^{(j)} &= 0, & \text{якщо } i &= s; \\ \phi_{is}^{(j)} &\geq & \text{якщо } 0, i &\neq s; \\ \sum_{s \in M_i} \phi_{is}^{(j)} &= 1. \end{aligned} \quad (2)$$

#### 2 група обмежень:

*Обмеження щодо інформаційного навантаження на систему радіозв'язку*

$$0 \leq \gamma_{ij} \phi_{is}^{(j)} \leq \varphi_{is}^{(j)}, \quad (3)$$

де  $\varphi_{is}^{(j)}$  – пропускна здатність лінії прямого зв'язку  $is$  виділена для інформаційного потоку від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції.

#### 3 група обмежень:

*Обмеження щодо швидкості проходження інформаційних потоків*

$$\lambda_{ij}^{\text{нбх}} \leq \sum_{g_{ij}=1}^{G_{ij}} \varphi_{g_{ij}}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{ij}^{\text{нбх}}$  – необхідна інтенсивність власного інформаційного потоку від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції;  $G_{ij}$  – кількість маршрутів від  $i$ -ї радіостанції до  $j$ -ї радіостанції;  $g_{ij}$  –  $g$ -й маршрут від  $i$ -ї радіостанції до  $j$ -ї радіостанції;  $\varphi_{g_{ij}}$  – пропускна спроможність маршруту  $g_{ij}$ .

*Обмеження щодо термінів проходження інформаційних потоків*

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^{\text{прип}} &\geq \sum_{sd \in g_{ij}} \tau_{sd}; \\ (\sigma_{ij}^{\text{прип}})^2 &\geq \sum_{sd \in g_{ij}} (\sigma_{sd})^2 \forall g_{ij}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\tau_{sd}$  та  $\sigma_{sd}$  – середня часова затримка та відхилення від середньої часової затримки пакетів інформаційних потоків в лінії прямого зв'язку  $sd$  маршруту  $g_{ij}$ ;  $\tau_{ij}^{\text{прип}}$  та  $\sigma_{ij}^{\text{прип}}$  – припустимі значення середньої часової затримки та відхилення від середньої часової затримки пакетів інформаційних потоків від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції.

*Обмеження щодо надійності доставки інформаційних потоків*

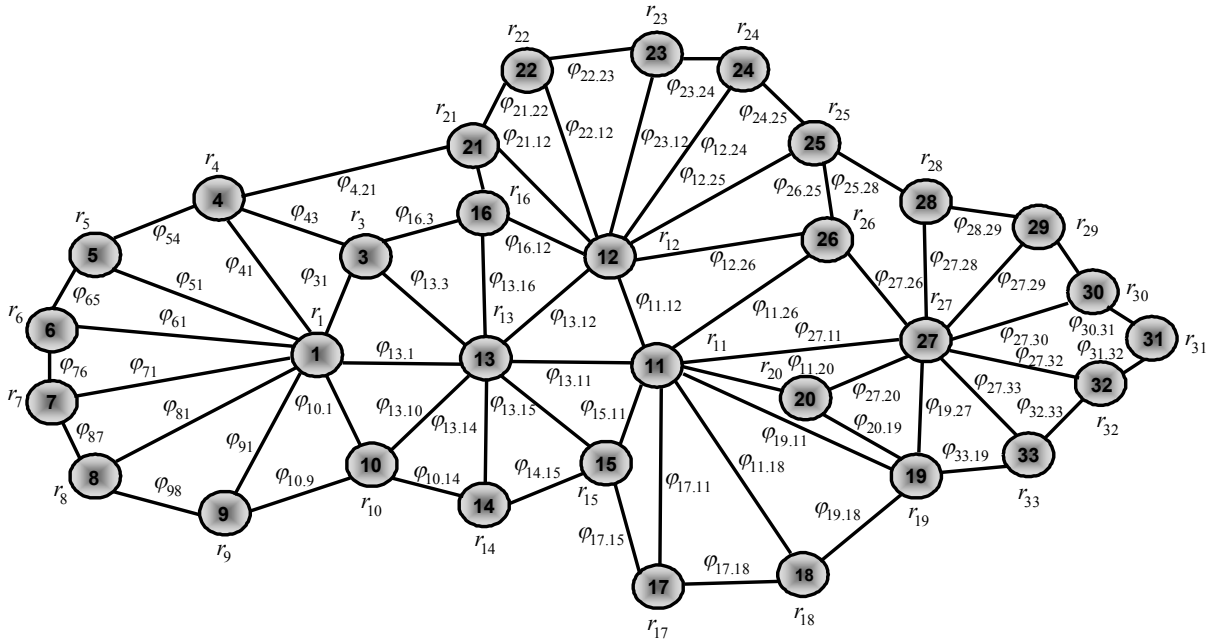


Рис. 1. Графова модель системи радіозв'язку

$$p_{ij}^{\text{нбх}} \leq \prod_{sd \in g_{ij}} p_{sd} \quad \forall g_{ij}, \quad (6)$$

де  $p_{sd}$  – ймовірність своєчасної доставки пакетів інформаційного потоку по лініях прямого зв'язку  $sd$  маршруту  $g_{ij}$ ;  $p_{ij}^{\text{нбх}}$  – необхідна ймовірність своєчасної доставки пакетів інформаційного потоку від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції.

Для подальшого розвитку методу математичного моделювання запровадимо ще одну групу обмежень, яка надасть змогу впливати на виконання завдань боротьби з радіорозвідкою противника:

4 група обмежень:

*Обмеження щодо розвідувальної доступності маршрутів проходження інформаційних потоків*

$$r_{(g_{ij})}^{\text{прип}} \geq \sqrt{\sum_{sd \in g_{ij}} r_{sd}^2} \quad \forall g_{ij}, \quad (7)$$

де  $r_{(g_{ij})}^{\text{прип}}$  – припустима розвідувальна доступність маршруту  $g_{ij}$ ;  $r_{sd}$  – розвідувальна доступність лінії прямого зв'язку  $sd$  ( $r_{sd} = \sqrt{r_s^2 + r_d^2}$ ) маршруту  $g_{ij}$ .

Щоб обмеження (1) – (7) можна було використовувати в подальшому, їх необхідно подати у вигляді аналітичних залежностей параметрів структури системи радіозв'язку від параметрів трафіка, показників якості обслуговування та розвідувальної доступності, що пропонується робити шляхом приведення графової моделі (рис. 1) до мультитензорного вигляду [12, 14].

Для цього існують другий та третій етапи даного методу математичного моделювання. Застосування теорії тензорного числення в цьому випадку передбачає перетворення наведеної вище графової моделі системи радіозв'язку у геометричний об'єкт та подальше маніпулювання ним [18, 19], що дозволяє

забезпечити балансування інформаційним навантаженням системи радіозв'язку та задовольнити індивідуальні потреби кожного конкретного трафіка.

Отже, *на другому етапі* методу математичного моделювання функціонування системи радіозв'язку, спираючись на [18, 19], здійснюється перетворення графової моделі системи радіозв'язку у геометричний об'єкт. Для цього застосовується поняття “узагальненої системи радіозв'язку”, як множини  $n$  окремих найпростіших елементів системи, які, з точки зору геометрії, утворюють  $n$ -вимірний простір (в подальшому простір). Найпростіші елементи системи радіозв'язку можуть бути різних типів, та в залежності від вимог конкретної задачі, можуть геометрично подаватися просторами різних типів та розмірностей.

Поєднуючи в різноманітний спосіб ці найпростіші елементи, ми будемо отримувати різні варіанти просторів-структур системи радіозв'язку, з кожним із яких пов'язується множина систем координат. Тобто, коли ми створюємо з найпростіших елементів структуру системи, ми отримуємо складні геометричні фігури, як сукупність різновимірних взаємопов'язаних просторів. Класифікація та вивчення властивостей таких складних геометричних фігур вимагає накладання на (вкладання в) ці сукупності просторів-структур геометричних конфігурацій різної розмірності: точок, площин тощо.

Накладання геометричних конфігурацій на простори-структури аналогічно накладанню параметрів процесу інформаційного обміну на структуру системи радіозв'язку. Тобто будемо вважати, що кожний з варіантів просторів-структур збуджується параметрами процесу інформаційного обміну. Зі зміною в часі миттєвих значень параметрів процесу інформаційного обміну ці геометричні конфігурації

описують певні криві. Накладання геометричних конфігурацій на простори-структури надає можливість встановити рівняння поведінки даних варіантів структур системи радіозв'язку.

Отже, необхідно знайти найбільш простий шлях отримання рівнянь поведінки системи радіозв'язку на всіх можливих варіантах її структур за умови, що ці рівняння вже отримані для однієї, так званої “примітивної структури”, яка виступатиме стартовою точкою для проведення відповідних розрахунків. Мовою геометрії, необхідно встановити відповідність між геометричними конфігураціями, накладеними на (вкладеними в) різні варіанти просторів-структур системи радіозв'язку.

Спираючись на викладене вище, графова модель системи радіозв'язку (рис. 1) може бути перетворена у геометричну модель, представлену у табл. 1.

З табл. 1 видно, що з точки зору геометрії, радіостанція може бути подана як 0-простір, лінія прямого зв'язку — як 1-простір, “примітивна” структура система радіозв'язку — як 8М-простір незв'язних 1-просторів, а довільна структура системи радіозв'язку — як 8М-простір незалежних замкнених та розімкнених шляхів. При цьому 8М-вимірність обумовлена тим, що для забезпечення стійкості зв'язку необхідно, щоб будь-яка радіостанція системи радіозв'язку мала радіодоступність хоча б до 8 радіостанцій-сусідів [11, 24].

**На третьому етапі** методу математичного моделювання застосовуються правила координатного перетворення [18, 19] для отримання залежностей компонентів базису  $\mathbf{V}$  від компонентів базису  $\mathbf{\Pi\Xi}$  та матриці  $\mathbf{A}$  коваріантного перетворення базисів ( $\mathbf{V} = \mathbf{A}(\mathbf{\Pi\Xi})$ ) і матриці  $\mathbf{C}$  контраваріантного перетворення базисів ( $\mathbf{C}\mathbf{A}^T = \mathbf{I}$ ) (табл. 2).

Далі по аналогії з [12, 14, 18, 19] з метою одночасного врахування різних обмежень (1) - (7) на довільній структурі системи радіозв'язку (табл. 1), а також зважаючи на те, що порядок вибору системи координат для кожної групи трафіків, які передаються між парами радіостанцій, може суттєво відрізнитися, та з метою зменшення обчислювальної складності задачі, здійснюється перетворення геометричної моделі системи радіозв'язку (табл. 1) у її мультитензорну модель (рис. 2).

Як можна бачити з (рис. 2), на відміну від існуючого підходу, у складі мультитензора функціонування системи радіозв'язку крім мультитензорів інтенсивностей інформаційних потоків, часових затримок інформаційних потоків, ймовірностей своєчасної доставки пакетів та відхилень від середніх часових затримок інформаційних потоків з'являється мультитензор розвідувальних доступностей маршрутів доставки пакетів інформаційних потоків від  $i$ -ї радіостанції для  $j$ -ї радіостанції.

Алгебраїчна діаграма даної мультитензорної моделі представлена на рис. 3.

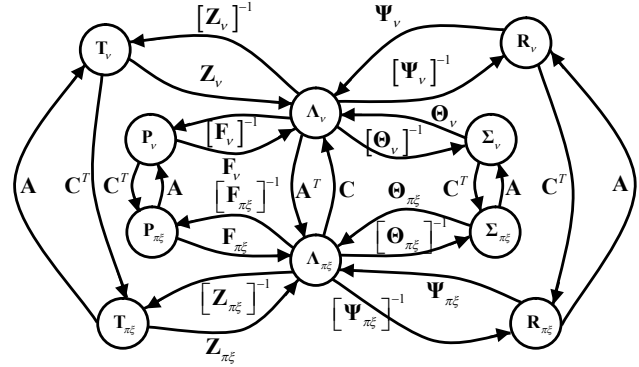


Рис. 3. Алгебраїчна діаграма мультитензорної моделі системи радіозв'язку

Інваріантні залежності мультитензора інтенсивностей інформаційних потоків від мультитензора часових затримок, мультитензора ймовірностей своєчасної доставки пакетів, мультитензора відхилень від середніх часових затримок інформаційних потоків та мультитензора розвідувальних доступностей маршрутів доставки пакетів інформаційних потоків визначаються відповідними метричними мультитензорами  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{\Theta}$ ,  $\mathbf{\Psi}$ , (рис. 4). В свою чергу, координати цих метричних мультитензорів в системах координат введених просторів  $W_V$  та  $W_{\Pi\Xi}$  (табл. 1) повністю визначаються моделлю обслуговування пакетів у каналах зв'язку (наприклад, моделлю системи масового обслуговування з відмовами), а вигляд отриманих залежностей залишається інваріантним до використовуваних моделей обслуговування черг на вузлах системи радіозв'язку. Застосовуючи проекції зазначених вище інваріантних залежностей (рис. 4) в системах координат просторів  $W_V$  та  $W_{\Pi\Xi}$  можна отримати системи рівнянь, що пов'язують параметри структури системи радіозв'язку та параметри трафіка, показники якості обслуговування, розвідувальну доступність (рис. 5). І вже з їх допомогою отримати аналітичні залежності для вимог щодо забезпечення припустимої середньої затримки інформаційного потоку на маршруті, необхідної ймовірності своєчасної доставки інформаційного потоку, припустимого відхилення від середньої затримки інформаційного потоку та припустимого рівня розвідувальної доступності маршруту (рис. 5).

Ці вимоги використовуються в якості обмежень під час розв'язання оптимізаційної задачі багатопляхової маршрутизації з цільовою функцією мінімуму інформаційного навантаження на канали зв'язку:

$$D = \min_{\varphi_{g_{ij}}} \lambda_{g_{ij}}, \forall (i, j). \quad (8)$$

Така постановка задачі характерна для класу задач нелінійного програмування через нелінійність вимог щодо забезпечення необхідної якості зв'язку та припустимої розвідувальної доступності маршрутів (рис. 5).

Табл. 1 Геометрична модель системи радіозв'язку



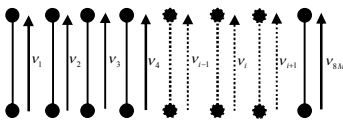
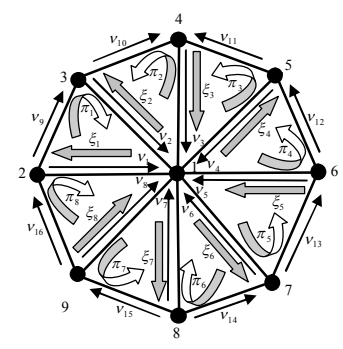
| Об'єкт моделювання                          | Модель  | Складові моделі  | Позначення   | Розмірність простору    | Базиси простору  |
|---|---|--|--------------|-------------------------|--|
| Радіостанція                                | 0-простір   | —  | $m_i$        | 0                       |   |
| Лінія прямого зв'язку                       | 1-простір (гілка)   | —  | $v_i$        | 1                       |   |
| "Примітивна" структура системи радіозв'язку | $8M$ - простір незв'язних гілок                           | Множина незв'язних гілок<br>$V = \{v_i, i = \overline{1, 8M}\}$  | $W_V$        | $8M$                    |   |
| Довільна структура системи радіозв'язку     | $8M$ - простір незалежних замкнених та розімкнених шляхів | Множина незалежних замкнених шляхів<br>$\Pi = \{\pi_i, i = \overline{1, \rho}\}$<br>( $\rho = 7M + 1$ ) та<br>множина незалежних розімкнених шляхів<br>$\Xi = \{\xi_i, i = \overline{1, \vartheta}\}$<br>( $\vartheta = M - 1$ ) | $W_{\Pi\Xi}$ | $\rho + \vartheta = 8M$ |  |

Табл. 2 Контраваріантне перетворення базисів

Залежність компонентів базису  $V$  від компонентів базису  $\Pi\Xi$

Матриця коваріантного перетворення  
( $V = A(\Pi\Xi)$ )

Матриця контраваріантного перетворення  
( $CA^T = I$ )

$$\begin{cases} v_1 = -\xi_1 \\ v_2 = -\xi_2 \\ v_3 = \xi_3 \\ v_4 = -\xi_4 \\ v_5 = \xi_5 \\ v_6 = -\xi_6 \\ v_7 = -\xi_7 \\ v_8 = \xi_8 \\ v_9 = \pi_1 + \xi_2 - \xi_1 \\ v_{10} = -\pi_2 - \xi_3 - \xi_2 \\ v_{11} = \pi_3 - \xi_3 - \xi_4 \\ v_{12} = \pi_4 + \xi_4 + \xi_5 \\ v_{13} = \pi_5 - \xi_5 + \xi_6 \\ v_{14} = -\pi_6 - \xi_7 + \xi_6 \\ v_{15} = -\pi_7 - \xi_7 - \xi_8 \\ v_{16} = \pi_8 + \xi_1 + \xi_8 \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

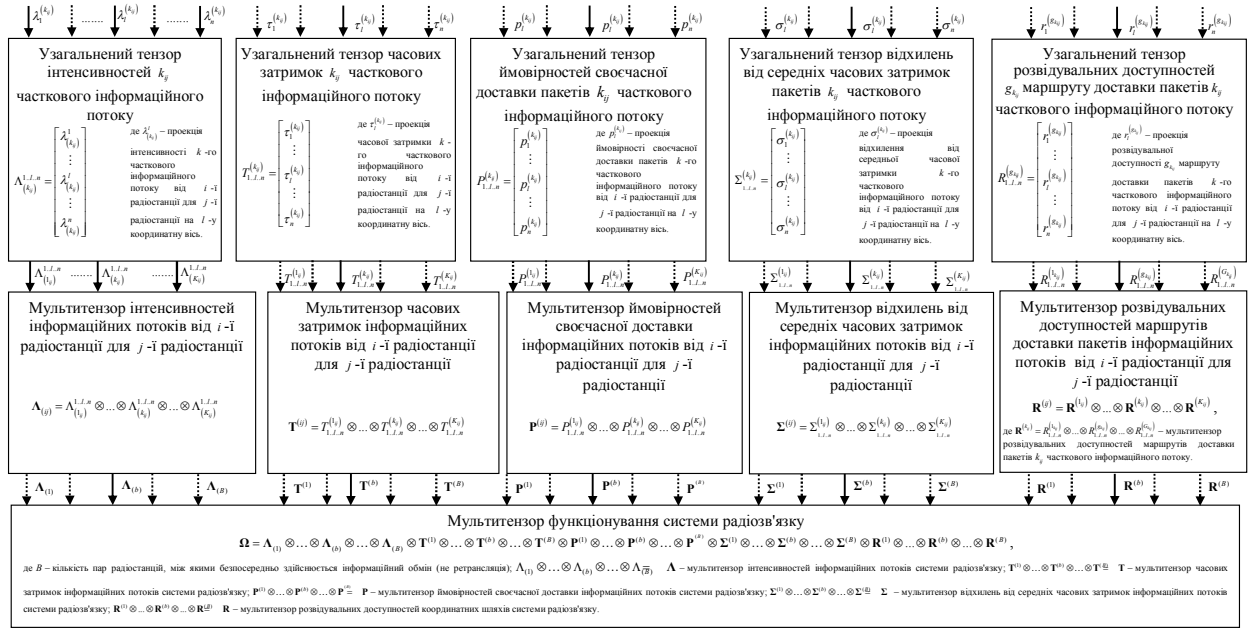


Рис. 2. Мультитензорна модель функціонування перспективної системи радіозв'язку

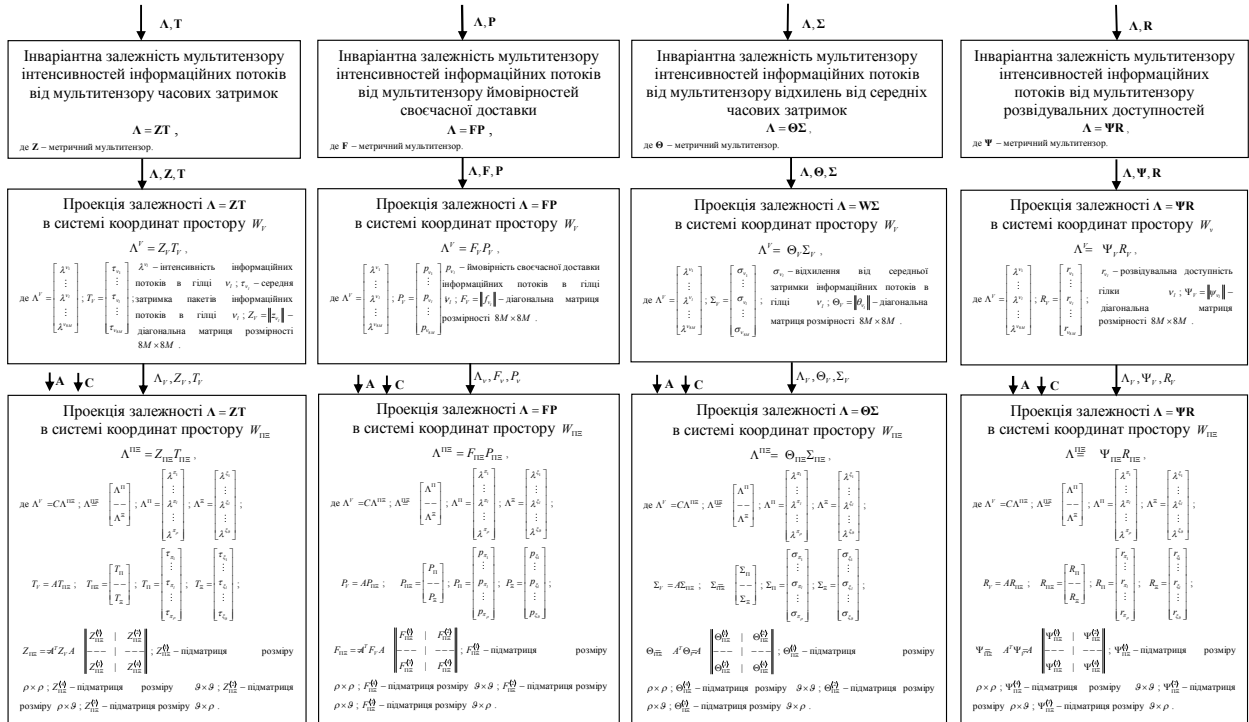


Рис. 4. Інваріантні залежності мультитензору інтенсивностей інформаційних потоків



Рис. 5. Вимоги щодо забезпечення необхідної якості зв'язку та припустимої розвідувальної доступності маршрутів

**Приклад розв'язання задачі.** Візьмемо умовну систему радіозв'язку, представлену на рис. 6. На лініях прямого зв'язку вказані їх пропускні спроможності (Мб/с), а біля радіостанцій – їх розвідувальні доступності.

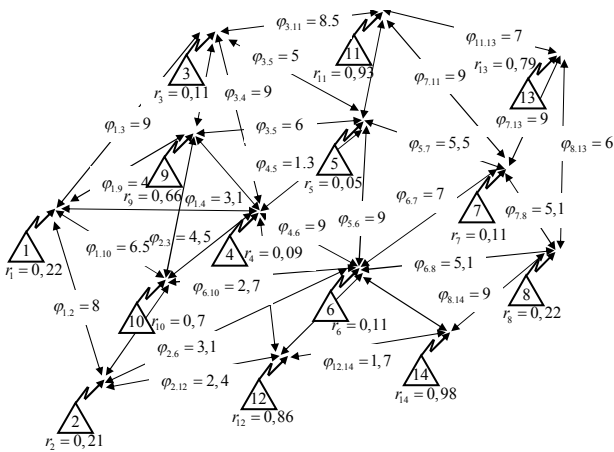


Рис. 6. Умовна система радіозв'язку

Необхідно забезпечити передачу пакетів однопродуктового трафіку від радіостанції 1 до радіостанції 8 при середній інтенсивності вхідного інформаційного потоку – 3300 пак./с, припустимій середній затримці інформаційного потоку – 37,5 мс, необхідній ймовірності своєчасної доставки інформаційного потоку – 0,9 (за умови, що ємність буферу складатиме 128 пакетів), припустимому відхиленню від середньої затримки інформаційного потоку – 3 мс та припустимій розвідувальній доступності маршрутів – 0,45.

В результаті розв'язання даної задачі методом мурашиних колоній [25] отримано глобальний оптимум, що досягається при використанні трьох маршрутів передавання інформаційних потоків, які відповідають висунутим вимогам щодо забезпечення необхідної якості зв'язку та припустимої розвідувальної доступності:  $M1$ : 1–2–6–8;  $M2$ : 1–3–4–6–5–7–8;  $M3$ : 1–4–6–7–8 (табл. 3).

Табл. 3 Результати розрахунків

| Номер лінії прямого зв'язку | Середня інтенсивність | Середня затримка | Ймовірність своєчасної доставки | Відхил. від серед. затр. | Розвідувальна доступність |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1.2                         | 2796                  | 13               | 0,95                            | 1,5                      | 0,31                      |
| 1.3                         | 3125                  | 7,8              | 0,97                            | 0,6                      | 0,25                      |
| 1.4                         | 2215                  | 12,5             | 0,96                            | 0,8                      | 0,24                      |
| 1.9                         | 311                   | 15,4             | 0,85                            | 1,6                      | 0,69                      |
| 1.10                        | 743                   | 20,6             | 0,9                             | 2                        | 0,73                      |
| 2.6                         | 1095                  | 10,5             | 0,97                            | 0,8                      | 0,24                      |
| 2.10                        | 907                   | 12,9             | 0,87                            | 1,1                      | 0,73                      |
| 2.12                        | 1140                  | 14,3             | 0,92                            | 1,7                      | 0,89                      |
| 3.4                         | 499                   | 6,2              | 0,99                            | 0,4                      | 0,16                      |
| 3.5                         | 550                   | 22,1             | 0,91                            | 2,1                      | 0,12                      |
| 3.9                         | 689                   | 19,5             | 0,9                             | 1,4                      | 0,67                      |
| 3.11                        | 324                   | 15,6             | 0,93                            | 1,8                      | 0,94                      |
| 4.5                         | 798                   | 20,2             | 0,89                            | 2,2                      | 0,1                       |
| 4.6                         | 2180                  | 9,3              | 0,99                            | 1                        | 0,14                      |
| 4.9                         | 909                   | 12,9             | 0,87                            | 1,1                      | 0,67                      |
| 4.10                        | 1016                  | 29,1             | 0,85                            | 0,9                      | 0,71                      |
| 4.12                        | 657                   | 21,3             | 0,91                            | 1,5                      | 0,86                      |
| 5.6                         | 1709                  | 5,7              | 0,98                            | 0,7                      | 0,1                       |
| 5.7                         | 1425                  | 3,3              | 0,98                            | 0,4                      | 0,12                      |
| 5.11                        | 491                   | 4,6              | 0,94                            | 1,6                      | 0,93                      |
| 6.7                         | 1696                  | 10,1             | 0,98                            | 0,6                      | 0,16                      |
| 6.8                         | 3369                  | 13,8             | 0,98                            | 0,7                      | 0,2                       |
| 6.12                        | 558                   | 17,8             | 0,93                            | 2,2                      | 0,87                      |
| 6.14                        | 112                   | 6,9              | 0,87                            | 2,4                      | 0,99                      |
| 7.8                         | 3133                  | 5                | 0,97                            | 0,5                      | 0,25                      |
| 7.11                        | 884                   | 23,3             | 0,85                            | 1,3                      | 0,94                      |
| 7.13                        | 796                   | 19,4             | 0,93                            | 0,8                      | 0,79                      |
| 8.13                        | 1257                  | 14,3             | 0,95                            | 1,9                      | 0,82                      |
| 8.14                        | 1399                  | 12,3             | 0,9                             | 2,3                      | 1                         |
| 9.10                        | 1077                  | 13               | 0,96                            | 1                        | 0,96                      |
| 11.13                       | 551                   | 19,7             | 0,88                            | 1,7                      | 1                         |
| 12.14                       | 484                   | 13,4             | 0,91                            | 2,1                      | 1                         |

## Висновки

Таким чином, запропоновано удосконалений метод математичного моделювання функціонування

системи радіозв'язку, що дозволяє розв'язувати задачу багатошляхової маршрутизації з урахуванням як вимог щодо забезпечення необхідної якості зв'язку так і припустимого рівня розвідувальної доступності маршрутів інформаційних потоків. Сутність методу полягає у поетапному переході від графової моделі системи радіозв'язку до її геометричної моделі та мультитензорної моделі, завдяки чому вдається отримати в аналітичному вигляді залежності параметрів структури системи радіозв'язку від параметрів трафіка, показників якості обслуговування та розвідувальної доступності, що використовуються в якості обмежень під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації.

## Перелік посилань

1. Меньшаков Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок / Ю.К. Меньшаков. – М. : МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. – 656 с.
2. Medhi D. Network routing: algorithms, protocols, and architectures / D. Medhi, K. Ramasamy. – Morgan Kaufmann Publishers, 2017. – 1018 p.
3. Matre V. A Literature Review of Reliable Multipath Routing Techniques / V. Matre, R. Karandikar // International Journal Of Engineering And Computer Science. – 2015. – Vol. 4, Iss. 3. – P. 10599-10602.
4. He J. Toward internet-wide multipath routing / J. He, J. Rexford // IEEE Network. – 2008. – Vol. 22, Issue 2. – P. 16-21.
5. Key P. Combined Multipath Routing and Congestion Control: a Robust Internet Architecture: TechReport MSR-TR-2005-111 / P. Key, L. Massoulie, D. Towsley. – Microsoft Research, 2005. – 6 p.
6. Javed U. Multipath protocol for delay-sensitive traffic / U. Javed, M. Suchara, J. He, J. Rexford // First international conference on Communication Systems And NETworks (COMSNETS). – 2009. – P. 1-8.
7. Merindol P. Improving Load Balancing with Multipath Routing / P. Merindol, J.-J. Pansiot, S. Cateloin // 17th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). – 2008. – P. 1-8.
8. Banner R. Multipath Routing Algorithms for Congestion Minimization / R. Banner, A. Orda // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2007. – Vol. 15, Issue 2. – P. 413-424.
9. Поповский В.В. Симплициальная модель оценки структурной сложности телекоммуникационных систем / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – Вып. 5. – С. 48-51.
10. Поповский В.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем / В.В. Поповский, А.В. Лемешко // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб.. – 2002. – Вып. 125. – С. 156-164.
11. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей / И.И. Пасечников. – М. : Машиностроение. – 2004. – 250 с.
12. Лемешко А.В. Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, О.А. Дробот // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2006. – № 144. – С. 16-22.
13. Лемешко А.В. Тензорная модель решения задачи многопутевой маршрутизации информационного трафика заданного объема с требуемым временем доведения в двухполюсных телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко // Прикладная радиоэлектроника. – 2003. – Том. 2, №2. – С. 140-146.
14. Лемешко А.В. Мультитензорная интерпретация решения маршрутных задач в телекоммуникационных сетях, представленных мнопродуктовыми многополюсными моделями евклидового пространства / А.В. Лемешко // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2003. – Вып. 3. – С. 115-126.
15. Лемешко А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 4 (9). – С. 16-31.
16. Лемешко А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной / А.В. Лемешко // Теоретичний та науково-практичний журнал радіозв'язку, радіомовлення і телебачення «Праці УНДІРТ». – 2004. – № 4 (40). – С. 12-18.
17. Стрелковская И.В. Использование тензорного метода при расчёте телекоммуникационной системы, представленной узловой сетью / И.В. Стрелковская, И.Н. Соколовская // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 68-75.
18. Крон Г. Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – М. : Сов. радио, 1978. – 719 с.
19. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем / А.Е. Петров. – М. : Радио и связь, 1985. – 152 с.
20. Волобуев А.П. Метод математичного моделювання радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення шляхом управління амплітудно-фазовим розподілом струму по розкриванню антен / А.П. Волобуев // Збірник наукових праць військової академії. – Одеса : ВА. – 2017. – № 1 (7). – С. 18-24.
21. Волобуев А.А. Математичне моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення з шумоподібними сигналами на основі фазової модуляції псевдовипадковою послідовністю / А.А. Волобуев, Д.А. Бухал, А.В. Сергієнко // Збірник наукових праць ВІПТ. – 2017. – № 3. – с. 32-40.
22. Волобуев А.А. Математичне моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення, яка застосовує шумоподібні сигнали з дискретною частотною модуляцією псевдовипадковою послідовністю / А.А. Волобуев, Д.А. Бухал // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2017. – № 2 (29). – С. 9-15.
23. Волобуев А.А. Математичне моделювання виявлення системою радіорозвідки противника системи радіозв'язку військового призначення, яка застосовує шумоподібні сигнали з частотно-фазовою модуляцією псевдовипадковою послідовністю / А.А. Волобуев, О.А. Усачова, Д.А. Бухал // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – №3(28). – С. 76-85.



24. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокими сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк – К.: Наук. думка, 2012. – 444 с.
25. Романченко І.С. Еволюційні методи оптимізації та їх використання у військовій галузі досліджень / І.С. Романченко, С.Л. Борисюк, М.М. Потьомкін. – Житомир : Рута, 2015. – 127 с.

## References

- [1] Men'shakov Yu.K. (2009) *Vidy i sredstva inostrannykh tekhnicheskikh razvedoke* [Types and facilities of foreign technical reconnaissance's]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 656 p.
- [2] Medhi D. and Ramasamy K. (2018) *Network Routing*, pp. xxvii-xxviii. DOI: 10.1016/b978-0-12-800737-2.00037-5
- [3] Matre V. and Karandikar R. A (2015) Literature Review of Reliable Multipath Routing Techniques. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, Vol. 4, Iss. 3, pp. 10599-10602.
- [4] He J. and Rexford J. (2008) Toward internet-wide multipath routing. *IEEE Network*, Vol. 22, Iss. 2, pp. 16-21. DOI: 10.1109/mnet.2008.4476066
- [5] Key P., Massoulie L. and Towsley D. (2007) Multipath Routing, Congestion Control and Dynamic Load Balancing. *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*. DOI: 10.1109/icassp.2007.367326
- [6] Javed U., Suchara M., He J. and Rexford J. (2009) Multipath protocol for delay-sensitive traffic. *2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops*. DOI: 10.1109/comsnets.2009.4808885
- [7] Merindol P., Pansiot J. and Cateloin S. (2008) Improving Load Balancing with Multipath Routing. *2008 Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks*. DOI: 10.1109/icccn.2008.ecp.30
- [8] Banner R. and Orda A. (2007) Multipath Routing Algorithms for Congestion Minimization. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 15, Iss. 2, pp. 413-424. DOI: 10.1109/tnet.2007.892850
- [9] Popovskii V.V., Lemeshko A.V. and Evseeva O.Yu. (2008) Simplitsial'naya model' otsenki strukturnoi slozhnosti telekommunikatsionnykh sistem [Simplicative model of estimation of structural complexity of telecommunication systems]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5, pp. 48-51.
- [10] Popovskii V.V. and Lemeshko A.V. (2008) Tenzorni analiz v zadachakh sistemnogo issledovaniya telekommunikatsionnykh sistem [Tensor analysis in the problems of system researching of telecommunication systems]. *Radiotekhnika KhNURE*, No. 125, pp. 156-164.
- [11] Pasechnikov I.I. (2004) *Metodologiya analiza i sinteza predel'no nagruzhennykh informatsionnykh setei* [Methodology of analysis and synthesis of extremely loaded information networks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 250 p.
- [12] Lemeshko A.V. and Drobot O.A. (2006) Model' mnogoputevoi QoS-marshrutizatsii v mul'tiservisnoi telekommunikatsionnoi seti [Model of multipath QoS-routing in multiservicing telecommunications network]. *Radiotekhnika KhNURE*, No. 144, pp. 16-22.
- [13] Lemeshko A.V. (2003) Tenzornaya model' resheniya zadachi mnogoputevoi marshrutizatsii informatsionnogo trafika zadannogo ob'ema s trebuemym vremenem dovedeniya v dvukhpolyusnykh telekommunikatsionnykh setyakh [Tensor model of solving the problem of multipath routing of information traffic of a given volume with the required time in two-pole telecommunication networks]. *Applied radio electronics*, Vol. 2, No. 2, pp. 49-53.
- [14] Lemeshko A.V. (2003) Mul'titenzornaya interpretatsiya resheniya marshrutnykh zadach v telekommunikatsionnykh setyakh, predstavlenykh mnoproduktovymi mnogopolyusnymi modelyami evklidovogo prostranstva [Multi-tensor interpretation of solution of routing problems in telecommunication networks represented by multiproduct multipole models of Euclidean space]. *Radiotekhnika i komp'yuternye sistemy*, No. 3, pp. 115-126.
- [15] Lemeshko A.V., Evseeva O. and Garkusha S. (2014) Research on tensor model of multipath routing in telecommunication network with support of service quality by greates number of indices. *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 73, Iss. 15, pp. 1339-1360. DOI: 10.1615/telecomradeng.v73.i15.30
- [16] Lemeshko A.V. (2004) Tensor Model of Multipath Routing of the Aggregated Flows with Reservation of Network Resources, Represented in Space with Curvature. *Pratsi UNDIRT*, No. 4 (40), pp. 12-18. (in Russian)
- [17] Strelkovskaya I. V., Solovskaya I. N. (2010) Using of tensor method for calculating the telecommunications network, which is presented by the nodal network. *Problemy telekomunikatsii*, No. 1 (1), pp. 68-75. (in Russian)
- [18] Kron G. (1939) *Tenzor analysis of networks*, New York, John Wiley and Sonc Inc., 635 p.
- [19] Petrov A.E. (1985) *Tenzornaya metodologiya v teorii sistem* [Tensor methodology in system theory]. Moscow, Radio i svyaz', 152 p.
- [20] Volobuev A.P. (2017) Metod matematychnoho modeluvannya radiomaskuvannya systemy radiozv'iazku viiskovoho pryznachennia shliakhom upravlinnia amplitudno-fazovym rozpodilom strumu po rozkryvanniu anten [Metod of mathematical simulating of radiomasking of radiocommunication system via amplitude-phase allocation of current regarding opening antennas]. *Zbirnyk naukovykh prats viiskovoi akademii*, No 1 (7), pp. 18-24.
- [21] Volobuyev A., Buhai D. and Sergienko A. (2017) Mathematical modeling of detection by a radio-intelligence system of an enemy of a military radiocommunication system with noise-like signals based on phase modulation by a pseudo-random sequence. *Zbirnyk naukovykh prats VITI*, No 3, pp. 32-40.
- [22] Volobuev A.P. and Bukhal D.A. (2017) Mathematical modeling of the detection by the radio reconnaissance system of enemy of military radio communication system that uses noise-type signals with discrete frequency modulation by a pseudo-random sequence. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 2 (29), pp. 9-15. (in Ukrainian)
- [23] Volobuev A., Usahova O. and Bukhal D. (2017) Mathematical modelling of tactical radio system (with frequency-phase-coded by pseudorandom sequence noise-like signals) detection by adversary signal intelligence. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, Iss. 3(28), pp. 76-85. DOI: 10.30748/nitps.2017.28.10
- [24] Bunin S.G., Voiter A.P., Il'chenko M.E. and Romanyuk V.A. (2012) *Samoorganizuyushchiesya radioseti so sverkhshirokimi signalami* [Self-organizing radio networks with ultra-wide signals], Kyiv, Nauk. Dumka, 444 p.

- [25] Romanchenko I.S., Borysiuk S.L. and Potomkin M.M. (2015) *Evolutsiini metody optymizatsii ta ikh vykorystannia u viiskovii haluzi doslidzhen* [Evolutionary methods of optimization and their use in the military research field], Zhytomyr, Ruta Publ., 127 p.

## Метод математического моделирования функционирования системы радиосвязи (метод мультитензора)

*Свида И. Ю., Волобуев А. П., Бухал Д. А.*

В статье предложен метод математического моделирования функционирования системы радиосвязи (метод мультитензора), который является основой для решения задачи многопутевой маршрутизации и учитывает кроме известных ограничений по обеспечению допустимой средней задержки информационного потока на маршруте, необходимой вероятности своевременной доставки информационного потока, допустимого отклонения от средней задержки информационного потока еще и ограничения по допустимой разведывательной доступности маршрутов прохождения информационных потоков, что является существенным для военной радиосвязи. Показано, что приведение к тензорному виду модели системы радиосвязи, основываясь на геометризации ее структуры с введением дискретного пространства, позволяет описать систему четырехвалентным геометрическим объектом смешанного измерения – мультитензором и определить маршруты следования информационных потоков с допустимой разведывательной доступностью.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; система радиосвязи; многопутевая маршрутизация; разведывательная доступность; информационный поток; тензорное исчисление.

## Mathematical Modeling Method of Radiocommunication System Functioning (Multi-Tensor Method)

*Svyda, I. Yu., Volobuev, A. P., Bukhal, D. A.*

Introduction. In connection with appearance of new generation radio intelligence systems in many countries in

the world, there is a discrepancy between the capabilities of existing radio communication systems to combat radio intelligence and the capabilities which needed to combat modern radio intelligence systems. This discrepancy requires the further development of electronic warfare methods of radio communication systems with new generation radio intelligence systems. One of the most promising directions of researches in this field is the mathematical modeling of radio communication systems functioning with the help of various tensor models with imposition restrictions on the intensity of information flows, timing and reliability of information passing, system load, etc. But the possibilities of this apparatus of mathematical modeling for solving the problems of new generation combating radio intelligence systems are somewhat limited (namely, it does not take into account the intelligence availability of individual radio stations, lines of direct communication and routes of information flows, which necessitates its further development). Therefore, the purpose of the article is the further development of the method of mathematical modeling of the functioning of the radio communication system on the basis of the apparatus of a tensor number in the interests of solving the multiway routing problem for adapting it to the problem of combating new generation radio intelligence systems. The article proposes a method for mathematical modeling of the radio communication system operation (a multi-tensor method), which is the basis for solving the problem of multiway routing and in addition to known restrictions of maintenance of acceptable average delay of information flow on route, required probability of timely delivery of information flow, acceptable deviation from average delay of information flow also considers restriction of route intelligence availability of information flows, which is essential military for radio communication. It is shown that the reduction of radio communication system model to the tensor type, based on the geometrization of its structure with the introduction of discrete space, allows us to describe the system with a tetravalent geometric object of mixed measurement – a multitenzer and to determine the routes of information flows with acceptable intelligence availability.

**Key words:** mathematical modeling; radio communication system; multiway routing; intelligence availability; information flow; tensor calculus.